

І. Ю. Тугай, к. т. н.

АНАЛІЗ ХАОТИЧНОГО ФЕРОРЕЗОНАНСУ В ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ ВИСОКОЇ НАПРУГИ

Проведено аналіз і запропоновано комплексну математичну модель, яка найбільш точно враховує всі початкові умови та адекватно описує хаотичні ферорезонансні процеси в електричних схемах реальної мережі.

Ключові слова: хаотичний ферорезонанс, електрична мережа, перенапруга, надструм.

Вступ

Ферорезонанс – це складні нелінійні коливання, які можуть виникати в будь-яких схемах електричної мережі з нелінійною індуктивністю та ємністю і супроводжуватися тривалими перенапругами та надструмами, що не обмежуються традиційними засобами придушення.

У якості нелінійних індуктивних елементів в електричних мережах можуть виступати, наприклад, електромагнітні трансформатори напруги. Ємнісними елементами можуть бути, наприклад, ємнісні дільники напруги у вимикачах, а також ємності шин та приєднаного до них обладнання.

За таких умов будь-які перехідні процеси, атмосферні перенапруги, підключення чи відключення трансформаторів, виникнення чи ліквідація коротких замикань та інші збурення можуть викликати появу ферорезонансного процесу. Ці процеси супроводжуються перенапругами та надструмами, які зумовлюють небезпеку таких режимів на практиці. Особливо це стосується ферорезонансів на основній частоті. Однак після впровадження сучасних цифрових засобів реєстрації аномальних процесів в електричних мережах виникла ймовірність появи нетрадиційних ферорезонансних процесів, таких як хаотичний ферорезонанс. Ініціюються хаотичні ферорезонансні процеси переважно під час комутаційних операцій і можуть призводити до некоректної роботи пристроїв релейного захисту та автоматики, а також до появи в обмотках трансформаторів напруги небезпечних надструмів, тому аналіз таких явищ є досить актуальним завданням.

Основна частина

Електричні мережі з номінальною напругою вищою за 110 кВ працюють з ефективним заземленням нейтралі, а трансформатори напруги, які в них встановлюють, виготовляють однофазними. тому для дослідження ферорезонансу доцільно використовувати однолінійну схему заміщення з моделлю однофазного трансформатора напруги, яку шляхом елементарних еквівалентних перетворень можна привести до класичної схеми послідовного ферорезонансного кола. Таке ферорезонансне коло складається з джерела живлення E ; сумарної ємності дільників напруги вимикача, ємностей шин і приєднаного до шин обладнання C ; опору R , який враховує втрати в трансформаторі напруги та нелінійної індуктивності трансформатора напруги L [1].

Залежно від особливостей протікання процесу ферорезонанс підрозділяють на чотири групи:

1. Періодичний ферорезонанс на основній частоті. Під час такого ферорезонансного процесу напруги та струми мають період, що дорівнює періоду системи, та можуть мати різну кількість гармонік. Спектр сигналу є дискретним і складається з основної частоти системи та її вищих гармонік.

2. Субгармонічний ферорезонанс. Напруги та струми також є періодичними з періодом,

кратним до періоду джерела живлення. Спектр має як основну частоту, так і гармоніки.

3. Квазіперіодичний ферорезонанс. Він не є періодичним. Спектр гармонічних складників за такого режиму дискретний.

4. Хаотичний ферорезонанс. Такий ферорезонанс не є періодичним. Відповідний спектр гармонічних складників є безперервним, тобто не пропускають жодної частоти [2].

Для розв'язання завдання аналізу хаотичних ферорезонансів процесів щодо запобігання їхнього виникнення та розвитку необхідно мати засоби виявлення необхідних і достатніх умов появи ферорезонансних процесів.

Зі зрозумілих причин експериментальні дослідження хаотичних ферорезонансів на шинах підстанцій високої напруги обмежені, тому для виявлення причин виникнення цих явищ і запобігання їхніх можливих негативних наслідків потрібно досліджувати режими методами математичного моделювання.

Як відомо, для ферорезонансних явищ характерним є тривалий перехідний процес, і тому використання традиційних моделей та методів, призначених для дослідження швидкоплинних електромагнітних перехідних процесів, часто є неефективним. Такі методи не дозволяють виявити небезпечні відхилення параметрів схеми та режиму із загрозою виникнення ферорезонансних процесів, особливо це стосується хаотичного ферорезонансу, тому для пошуку достатніх умов постає необхідність у розробці математичних моделей, які адекватніше описують хаотичні ферорезонансні процеси порівняно з традиційними моделями.

Як вже було вказано раніше, для появи ферорезонансних процесів в електричних мережах необхідна наявність індуктивного елемента з феромагнітним осердям. Саме точність математичних моделей трансформаторів більш за все впливає на вірогідність результатів розрахунку ферорезонансу. Найбільш задовільну точність забезпечує використання поліному 11-го порядку. Однак для розробки більш адекватних математичних моделей трансформаторів із метою аналізу хаотичних ферорезонансів необхідно враховувати ефект гістерезису. Це дозволяє зробити модель Джіlsa – Атертона, яку записують у вигляді диференційного рівняння, а для її ідентифікації достатньо однієї петлі гістерезису, отриманої експериментально:

$$\frac{dM}{dH} = \frac{1}{(1+c)k\delta - \alpha(M_{an} - M)} + \frac{c}{1+c} \frac{dM_{an}}{dH}, \quad (1)$$

де M – сумарне намагнічування сталевого осердя трансформатора;

$M_{an} = M_s \left(\operatorname{cth} \left(\frac{H_e}{a} \right) - \frac{a}{H_e} \right)$ – безгістерезисне намагнічування; M_s – намагнічування

насичення; $H_e = H + \alpha M$ – ефективне поле доменів; a – коефіцієнт форми безгістерезисної

кривої, який визначають як величину напруженості, за якої: $M_{an} = \frac{M_s}{2}$; k – коефіцієнт, що

визначає ширину петлі гістерезису; α – коефіцієнт, постійна скріплення доменних границь;

δ – коефіцієнт перемагнічування, приймаємо як: $\delta = 1$ за $\frac{dH}{dt} > 0$ та $\delta = -1$ за $\frac{dH}{dt} < 0$.

За допомогою математичної моделі (1) можна змоделювати всі риси гістерезису. Для опису поведінки нелінійної індуктивності необхідно задати п'ять основних параметрів. Алгоритм ідентифікації заданої петлі гістерезису має два ітераційні цикли – внутрішній та зовнішній. На внутрішньому циклі розв'язують систему алгебраїчних рівнянь. На зовнішньому циклі методом Рунге – Кута розв'язують систему диференціальних рівнянь. Степінь адекватності моделі реальним даним можна вважати достатньою, і в будь-якому разі значно більшою, ніж традиційне використання основної кривої намагнічування. Окрім цього,

описана модель розроблена з орієнтацією на застосування обчислювальної техніки, тому має швидкий та стабільний алгоритм реалізації [3].

Для аналізу хаотичного ферорезонансного процесу була використана вихідна схема підстанції «Північна» (рис. 1), надана службами Центральної енергосистеми. Шляхом еквівалентних перетворень вона була приведена до схеми послідовного ферорезонансного кола. Необхідним індуктивним елементом для утворення контуру був трансформатор напруги на III секції шин, а ємностями – ємності дільників вимикачів ВВ-330 та ВВ-330-I ЧАЕС і ємності ЛЕП, обладнання та шин підстанції відносно землі.

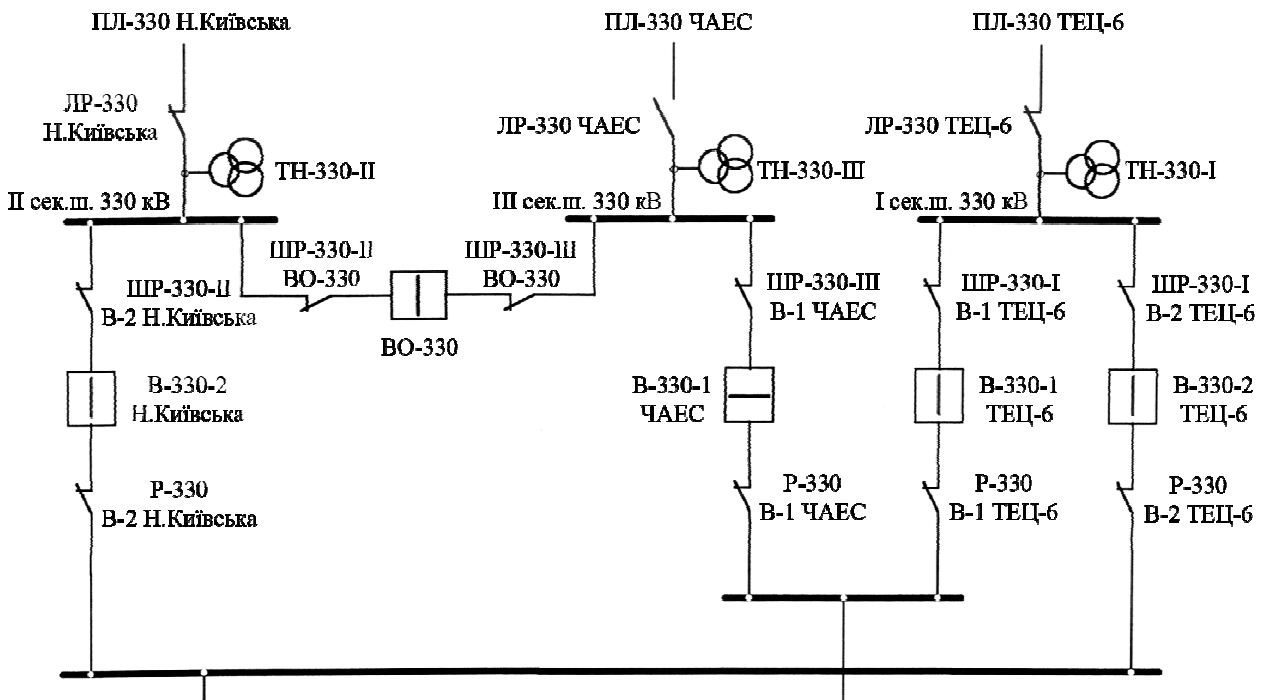


Рис. 1. Схема розподільчого пристрою підстанції «Північна» 330 кВ Центральної енергосистеми

Як можна побачити на рис. 1, на фазі А з'явилась напруга з амплітудою близько 70% робочої, причому у фазах В та С такого зростання напруг не спостерігаємо. Такий режим є неприпустимим, оскільки інформація про напруги, яку одержують від первинних датчиків, є недостовірною. Крім того, по обмотці протікає струм, який перевищує гранично допустимий, відбувається нагрівання і теплове руйнування ізоляції, що призводить до виткових замикань і, у результаті, до пошкодження трансформатора напруги. Також негативного впливу хаотичні ферорезонанси завдають пристроям релейного захисту та автоматики, які підключають до вторинних кіл трансформатора напруги. Цей вплив проявляється в недостовірній інформації під час опробування шин на наявність напруги та, як наслідок, відмові АПВ шин після ліквідації дугового короткого замикання. У результаті шини залишаються відімкненими.

Це щодо розрахунку для визначення достатніх умов виникнення хаотичного ферорезонансу. Стосовно визначення необхідних умов розвитку хаотичного ферорезонансного процесу, то причини труднощів стають зрозумілими після застосування підходів нелінійної динаміки. Як відомо, рівняння для коливальної системи, миттєвий стан якої задають дві величини, узагальнена координата x та її похідна, і на яку діє зовнішня періодична сила визначають нелінійним дисипативним осцилятором:

$$\frac{d^2x}{dt^2} + \gamma \frac{dx}{dt} + f(x) = A \cos \omega t, \quad (2)$$

де t – час; ω – кругова частота системи.

Диференціальне рівняння, що описує процес у ферорезонансному колі:

$$\frac{d^2\psi}{dt^2} + \frac{G}{C} \frac{d\psi}{dt} + \frac{1}{C} i_L = \omega E \cos(\omega t + \delta), \quad (3)$$

де ψ – потокозчеплення обмотки трансформатора напруги; G – провідність, яка враховує втрати в магнітопроводі трансформатора напруги підстанції; C – еквівалентна сумарна ємність дільників напруги вимикача C_B , ємностей шин і приєднаного до шин обладнання C_{III} ; E – електрорушійна сила.

Якщо порівняти диференціальне рівняння стану ферорезонансного кола (3) з рівняннями теорії нелінійної динаміки (2), стає очевидним, що воно є нелінійним дисипативним осцилятором. Важливим є факт, що під дією зовнішньої періодичної сили цей осцилятор може мати три типи рухів: періодичний (з основною частотою або кратною до неї); псевдоперіодичний (спектр складається із частот не кратній основній) та хаотичний (безперервний спектр частот). Також важливо, що будь-який із цих типів має свій атрактор – множину, де сходяться всі траєкторії, що почалися у певній області простору – басейні атрактора. Для нас важливим є те, що, незважаючи на свою непередбачуваність, у фазовому просторі дисипативних систем існують атрактори навіть для хаотичних траєкторій. Це так звані дивні атрактори – складно влаштовані множини, що мають більш тонку структуру на різних рівнях їх поділу та нецілочислову розмірність (фрактали).

Отже, хоча знаходження системи в конкретний момент часу в конкретній точці фазового простору принципово неможливо передбачити, область знаходження об'єкта і його рух до атрактора передбачувані. Це дає підстави стверджувати, що існує можливість оцінити наявність необхідних умов для хаотичного ферорезонансного процесу в реальній електричній мережі за будь-якого поєднання параметрів, оскільки для цього досить вивчити атрактори дисипативної системи, тому, незважаючи на існування хаотичної непередбачуваності ферорезонансного процесу, наявність атракторів та їхніх басейнів свідчить про наявність визначення небезпечних зон у просторі зміни параметрів.

Метод діаграм біфуркацій, точок, де система переходить від одного типу режиму до іншого, може бути використаний для виявлення зон небезпечних значень параметрів, що можуть зумовлювати хаотичний ферорезонанс. Пошук цих точок можна вести безпосередніми розрахунками, але їх треба десятки тисяч для кожного з параметрів, тому доцільно виконувати направлений перебір можливих варіантів: рухатися від однієї точки стабільності до іншої, виконуючи лінійний пошук в околицях останньої точки – метод продовжень. Для цього був використаний пакет програм WINPP, який є у вільному доступі. Пакет має дві функціональні частини. Перша частина дозволяє знайти початкову точку для побудови діаграми біфуркацій, тобто нормальний усталений режим без перенапруг. Друга частина дозволяє реалізувати метод продовжень за обраним параметром схеми заміщення ферорезонансного кола. Результати можна спостерігати у вигляді послідовної побудови діаграми біфуркації [4].

Щоб провести дослідження наявності необхідних умов виникнення хаотичного ферорезонансу в схемі розподільчого пристрою підстанції з номінальною напругою 330 кВ (рис. 1), була розрахована система рівнянь, яку використовували у програмі WINPP. Для цього було розглянуто диференціальне рівняння:

$$\frac{d\psi}{dt} + \frac{1}{C} \int idt + Ri = E' \sin \alpha t, \quad (4)$$

де R – втрати в обмотках, зумовлені навантаженням вторинної обмотки трансформатора напруги; E' – еквівалентна електрорушійна сила, яку визначають за виразом:

$$E' = E \frac{C_B}{C_B + C_{III}}.$$

Апроксимацію кривої намагнічування трансформатора напруги виконував поліном 11-го степеню:

$$i_L(\psi) = a\psi + b\psi^{11}, \quad (5)$$

де i_L – струм намагнічування; a , b – коефіцієнти апроксимації кривої намагнічування трансформатора напруги.

Тоді систему рівнянь для програми WINPP можна записати як:

$$\begin{aligned} \frac{d\psi}{dt} &= \psi_1; \\ \frac{d\psi_1}{dt} + \frac{G + aRC + 10bRC\psi^{10}}{C(1+RG)}\psi_1 + \frac{a}{C(1+RG)}\psi + \frac{b}{C(1+RG)}\psi^{11} &= E'' \cos \alpha t, \end{aligned} \quad (6)$$

де E'' – еквівалентна електрорушійна сила, яку розраховують за формулою: $E'' = \frac{\omega}{1+RG} E'$.

Розрахунки за допомогою програми WINPP показали, що хаотичний ферорезонанс ініціюється в обмеженому діапазоні значень ємностей шин розподільчого пристрою підстанції «Північна» 330 кВ Центральної енергосистеми, причому під час переходу від нормального режиму до хаотичного ферорезонансу спостерігається біфуркація. Після побудови діаграми біфуркацій для параметра навантажень було знайдено, що біфуркація з появою хаотичного ферорезонансу можлива тільки до величини опору 500 МОм. Далі на діаграмі з'являються гілки тільки ферорезонансу на основній частоті.

Висновки

Досліджено виникнення та розвитку хаотичного ферорезонансу в електричних мережах високої напруги за допомогою математичної моделі, яка більш адекватно описує хаотичні ферорезонансні процеси порівняно з традиційними моделями. Аналіз був проведений для підстанції «Північна» 330 кВ Центральної енергосистеми. Аналогічні дослідження можуть бути проведені для типових схем розподільчих пристроїв підстанцій напругою 110 – 500 кВ з електромагнітними трансформаторами напруги.

Результати цих досліджень можуть бути застосовані під час розробки нового нормативного документа Міністерства енергетики та вугільної промисловості України з виявлення ферорезонансних процесів у електричних мережах високої напруги і запобігання їм та під час розробки нового програмного забезпечення для використання в енергосистемах Національної енергетичної компанії «Укренерго».

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Тугай І. Ю. Визначення наявності умов виникнення ферорезонансного процесу в електричних мережах високої напруги / І. Ю. Тугай // Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України. – 2014. – Вип. 39. – С. 9 – 12.
2. Ferracci P. Ferroresonance / P. Ferracci // Cahier technique. Schneider Electric. – Paris, 1998. – No. 190. – P. 1 – 28.

3. Jiles D. C. Theory of ferromagnetic hysteresis: determination of model parameters from experimental hysteresis loops / D. C. Jiles, J. B. Thoelke // IEEE Transactions on Magnetics. – September 5, 1989. – Vol. 25. – P. 3928 – 3930.

4. Кузнецов В. Г. Аналіз ферорезонансних процесів в розподільчому пристрої підстанції високої напруги за допомогою методів нелінійної динаміки / В. Г. Кузнецов, І. Ю. Тугай // Технічна електродинаміка (Темат. вип. «Силова електроніка та енергоефективність»). – 2012. – Ч. 3. – С. 33 – 34.

Тугай Ірина Юрївна – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник відділу оптимізації систем електропостачання, tugai@ukr.net.

Інститут електродинаміки Національної академії наук України.